



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

H03B 5/00 (2024.08)

(21)(22) Заявка: 2024114376, 27.05.2024

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
27.05.2024

Дата регистрации:
30.01.2025

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 27.05.2024

(45) Опубликовано: 30.01.2025 Бюл. № 4

Адрес для переписки:

603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
ИПФ РАН, патентная группа

(72) Автор(ы):

Иванов Антон Алексеевич (RU),
Минеев Кирилл Владимирович (RU),
Розенталь Роман Маркович (RU),
Сидоров Даниил Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение "Федеральный
исследовательский центр Институт
прикладной физики им. А.В.
Гапонова-Грехова Российской академии
наук" (ИПФ РАН) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: R.M. Rozental, S.V. Samsonov, A.A.
Bogdashov, I.G. Gachev, A.A. Ivanov, M.V.
Kamenskiy "Self-mode-locking regime in a K-
band gyro-TWT with external reflections", 2022
г. RU 2118041 C1, 20.08.1998. RU 2421876 C1,
20.06.2011. RU 2717337 C1, 23.03.2020. US
6768266 B2, 27.07.2004. CN 109150118 A,
04.01.2019.

(54) Устройство генерации стабилизированной последовательности коррелированных импульсов в СВЧ диапазоне

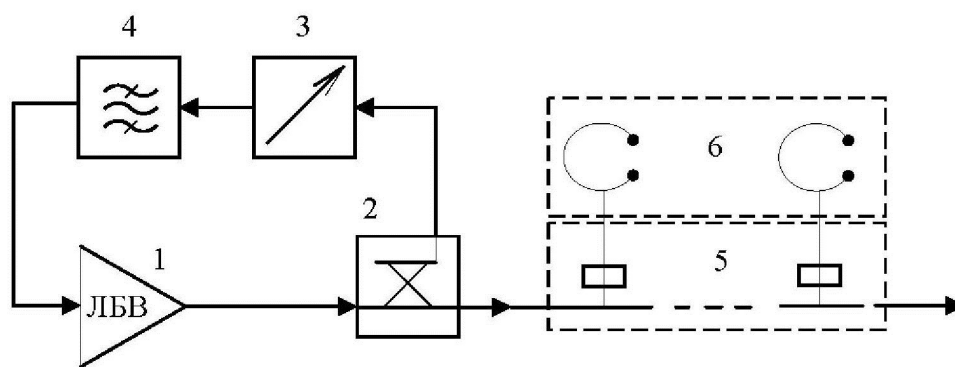
(57) Реферат:

Изобретение относится к технике СВЧ и может быть использовано для генерации высоко стабильной последовательности коррелированных импульсов. Технический результат – обеспечение генерации стабилизированной последовательности коррелированных импульсов наносекундной и субнаносекундной длительностей в СВЧ диапазоне. Такой результат достигается за счет того, что в цепи обратной связи после регулируемого аттенюатора установлен полосовой фильтр, настроенный на выделение полосы частот $\Delta F = N\Delta f$, где Δf – расстояние между соседними модами в спектре генерируемой последовательности импульсов, а

к выходу основного плеча направленного ответвителя посредством согласующей волноводной линии подключен резонаторный блок, состоящий из N высокодобротных объемных резонаторов, причем частота каждого i-го объемного резонатора f_{0i} настроена на частоту соответствующей моды f_i из спектра генерируемой последовательности импульсов ΔF , ненагруженная добротность каждого i-го объемного резонатора Q_i превышает ненагруженную добротность схемы генератора без резонаторного блока Q_0 , а фазовый сдвиг между выходом ЛБВ и конкретным i-м объемным

резонатором подобран из условия баланса фаз

$\varphi_i = m_i\pi$, где $m_i = 1, 2, \dots, 2$ ил.



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
H03B 5/00 (2024.08)

(21)(22) Application: **2024114376, 27.05.2024**

(24) Effective date for property rights:
27.05.2024

Registration date:
30.01.2025

Priority:

(22) Date of filing: **27.05.2024**

(45) Date of publication: **30.01.2025** Bull. № 4

Mail address:

**603950, g. Nizhnij Novgorod, ul. Ulyanova, 46, IPF
RAN, patentnaya gruppa**

(72) Inventor(s):

**Ivanov Anton Alekseevich (RU),
Mineev Kirill Vladimirovich (RU),
Rozental Roman Markovich (RU),
Sidorov Daniil Aleksandrovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov
Institute of Applied Physics of the Russian
Academy of Sciences (IAP RAS) (RU)**

(54) **DEVICE FOR GENERATING STABILIZED SEQUENCE OF CORRELATED PULSES IN MICROWAVE RANGE**

(57) Abstract:

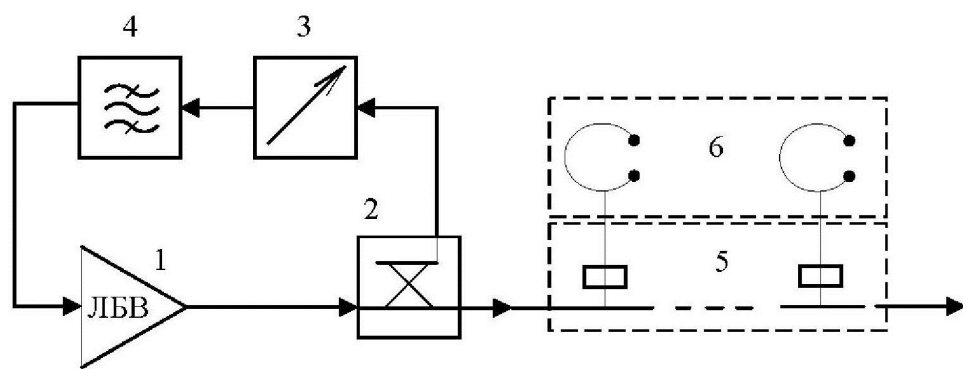
FIELD: microwave equipment.

SUBSTANCE: invention relates to microwave engineering and can be used to generate a highly stable sequence of correlated pulses. In the feedback circuit, after the adjustable attenuator, a band-pass filter is installed, which is tuned to allocate a frequency band $\Delta F = N\Delta f$, where Δf is distance between adjacent modes in spectrum of generated sequence of pulses, and to the output of the main arm of the directional coupler by means of a matching waveguide line a resonator unit consisting of N high-Q cavity resonators is connected, wherein the frequency of each i-th cavity resonator f_{0i}

is tuned to the frequency of the corresponding mode f_i from the spectrum of the generated pulse sequence ΔF , the unloaded Q-factor of each i-th cavity resonator Q_i exceeds the unloaded Q-factor of the generator circuit without the resonator unit Q_0 , and the phase shift between the output of the TWT and the specific i-th cavity resonator is selected from the phase balance condition $\varphi_i = m_i\pi$, where $m_i = 1, 2, \dots$

EFFECT: generation of a stabilized sequence of correlated pulses of nanosecond and subnanosecond duration in the microwave range.

1 cl, 2 dwg



Фиг.1

Изобретение относится к технике СВЧ и может быть использовано для генерации высоко стабильной последовательности коррелированных импульсов наносекундной и субнаносекундной длительностей.

Известно «Устройство формирования мощных импульсных СВЧ-сигналов» (патент 5 ИМ RU 110885, МПК H03K 5/04, публ. 27.11.2011 г.), состоящее из автогенератора, устройства временной компрессии, сканирующей фазированной антенной решетки с N элементами и зонированного зеркала. Устройство временной компрессии, вход которого соединен с выходом автогенератора, формирует на своем выходе короткие СВЧ импульсы мощностью до $P = MP_T$ где M - коэффициент усиления по мощности 10 устройства временной компрессии, P_T мощность автогенератора. Заявлено, что при мощности автогенератора 1 МВт, коэффициенте усиления мощности устройства временной компрессии в районе 100 длительность радиоимпульса на выходе устройства при уровне мощности равной 100 МВт составляет 125 нс. Недостатком данного типа 15 устройств, содержащих устройства временной компрессии, выступающие в качестве накопителей электромагнитной энергии, является трудность осуществления быстрого переключения из режима накачки энергии в резонатор в режим вывода накопленной энергии в полезную нагрузку. Вывод энергии должен осуществляться за промежутки времени меньший, чем постоянная времени резонаторного накопителя, иначе большая часть накопленной энергии будет рассеиваться в его стенках. Это принципиальное 20 ограничение не позволяет реализовать генератор последовательности коротких импульсов с малыми значениями скважности.

Известен способ генерации последовательности ультракоротких импульсов с наносекундным периодом следования на основе релятивистской лампы обратной волны (РЛОВ) в режиме сверхизлучения (Тотьменников Е.М. и др. «Экспериментальная 25 реализация способа генерации последовательности ультракоротких гигаваттных импульсов черенковского сверхизлучения с наносекундным периодом следования». Письма в ЖЭТФ, 2022, том 115, вып. 8, С. 479-483). Принцип работы РЛОВ в режиме сверхизлучения основан на накопительном отборе энергии у электронов ультракоротким электромагнитным импульсом, распространяющимся навстречу электронному потоку. 30 Наличие цепи обратной связи, реализованной в РЛОВ при помощи волновых отражателей на краях области электронно-волнового взаимодействия, приводит к тому, что каждый сформировавшийся ультракороткий импульс вызывает зарождение следующего импульса. Экспериментально продемонстрировано получение нескольких периодов импульсов СВЧ колебаний с 10 ГГц частотным заполнением с длительностью периода в 5,9 нс при длительности одного импульса по полувысоте около 0,8 нс. Пиковая 35 мощность импульсов составляла от 0,8 до 1,3 ГВт. Достоинством данного способа генерации является возможность получения большой пиковой мощности в каждом импульсе из последовательности, которая даже может превышать мощность электронного пучка, однако реализация указанного способа требует использования 40 сильноточных импульсных генераторов, представляющих собой высоковольтные стационарные установки на базе ускорителей электронов.

Известен генератор коррелированной последовательности наносекундных импульсов на основе гиро-ЛБВ (лампы бегущей волны) сантиметрового диапазона длин волн в режиме самосинхронизации мод (Rozental R.M. et al. «Self-Mode-Locking Regime in a K-Band Gyro-TWT With External Reflections»). IEEE Electron Device Letters, vol. 44, no. 1, pp. 140-143, 2023), являющийся аналогом к указанному изобретению. Для получения 45 стационарной генерации в гиро-ЛБВ введена внешняя обратная связь, реализованная на двух диэлектрических пластинах толщинами 2,21 и 1,82 мм, применяемых в качестве

полупрозрачных отражателей в указанном диапазоне длин волн. В режиме самосинхронизации мод сигнал на выходе генератора имеет эквидистантный спектр, число гармонических составляющих которого определяется выбранным рабочим режимом giro-ЛБВ, где начинает проявляться устойчивая стационарная генерация последовательности наносекундных импульсов. Достоинством рассмотренного генератора импульсов на основе giro-ЛБВ является относительная простота реализации режима самосинхронизации мод, высокая степень корреляции генерируемых импульсов при малых значениях скважности. Тем не менее, без создания дополнительных мер по стабилизации, данная схема сильно подвержена влиянию дестабилизирующих факторов, основным из которых является нестабильность параметров высоковольтного источника питания giro-ЛБВ, приводящая к нестабильности частот возбуждаемых мод и срыву самосинхронизации.

Известен способ стабилизации частоты автогенератора при помощи сверхпроводящего металлического объемного резонатора (АС SU 139343 «Способ стабилизации частоты», МПК H03B 15/00, публ. 1961 г.). Сигнал автогенератора, реализованного на ЛБВ, пройдя через развязывающий ферритовый вентиль, поступает на резонатор, откуда по цепи обратной связи, содержащей аттенуатор для подбора амплитуды сигнала обратной связи и фазовращатель, дающий возможность подобрать фазу сигнала в цепи обратной связи, удовлетворяющую условию самовозбуждения, снова поступает на вход той же ЛБВ. Частота генерируемого сигнала определяется настройкой резонатора и может быть выбрана произвольной в диапазоне эффективной работы ЛБВ. Стабильность частоты генератора при использовании описанного способа может достигать порядка 10^{-9} . Существенным недостатком данного способа является необходимость использования криорефрижераторных установок для охлаждения сверхпроводящего резонатора до температур ниже уровня жидкого гелия. Схема устройства, реализующая заявленный способ, является аналогом к указанному изобретению.

Известен способ стабилизации частоты магнетрона с помощью высокодобротного резонатора СВЧ (Грановская Р. А., Телятникова Л.И. «Магнетронные генераторы и импульсные модуляторы: Учебное пособие». М.: МАИ, 1985, 52 с.). Фиксирующая способность системы стабилизации частоты магнетрона определяется величиной нагруженной добротности его анодного блока Q и связана с контурным коэффициентом полезного действия (КПД) этого же блока следующим соотношением:

$$\eta_{\text{кон}} = 1 - \frac{Q}{Q_0},$$

где Q_0 - ненагруженная добротность анодного блока.

С целью повышения стабильности частоты без потери КПД необходимо одновременно увеличивать ненагруженную добротность Q_0 и нагруженную добротность Q генератора, что осуществляется введением в цепь магнетрона дополнительного резонатора, настроенного на рабочую частоту генерируемого сигнала, обладающего большой ненагруженной добротностью:

$$Q_{0\text{рез}} = 2\pi \frac{W_{\text{нак}}}{W_{\text{рас}}},$$

где $W_{\text{нак}}$ - энергия, накопленная в резонаторе на резонансной частоте,

$W_{\text{рас}}$ - энергия, рассеиваемая за период на резонансной частоте.

Фиксирующая способность системы стабилизации повышается при соблюдении условия $Q_{0\text{рез}} > Q_0$. Указанная реализация способа стабилизации частоты магнетрона с помощью дополнительного высокочастотного резонатора является аналогом предлагаемого изобретения.

Известен способ генерации периодической последовательности коррелированных импульсов на основе самосинхронизации мод в спиральной ЛБВ (Сидоров Д.А. и др. «Экспериментальное наблюдение режимов самосинхронизации мод в спиральной ЛБВ с запаздывающей обратной связью». Электронная техника. Сер. I. СВЧ-техника, 2022, Вып. 3(554), С. 55-63). Указанный способ был реализован на основе макета спиральной ЛБВ типа «О» С-диапазона, где для получения режима самосинхронизации мод часть выходного сигнала через регулируемый аттенюатор подавалась на вход ЛБВ, и по мере увеличения глубины положительной обратной связи в системе последовательно происходило самовозбуждение и переход к режимам периодической автомодуляции, где производилась генерация последовательности коротких импульсов длительностью 2,5 нс по полувысоте, что соответствует ширине спектра в 400 МГц по уровню -3 дБ. Однако приведенное значение ширины спектра было получено только после применения цифровой фильтрации зарегистрированного сигнала, в то время как реальный сигнал на выходе ЛБВ в режиме самосинхронизации мод имел ширину спектра в 1,5 ГГц и содержал область паразитных низкочастотных гармонических составляющих, мощность которых может даже превосходить мощность гармонических составляющих полезного сигнала. Следует добавить, что описанная реализация указанного способа имеет схожие недостатки в виде нестабильности параметров высоковольтного источника питания, что и генератор последовательности импульсов на основе gyro-ЛБВ, приводящие к нестабильности частот возбуждаемых мод и срыву самосинхронизации. Устройство на основе макета спиральной ЛБВ типа «О» С-диапазона с положительной обратной связью, реализующее способ генерации периодической последовательности коррелированных импульсов на основе самосинхронизации мод, выбрано в качестве прототипа заявленного изобретения.

Перечисленные выше аналоги и прототип обладают рядом признаков, совокупность которых необходима, но недостаточна для обеспечения генерации высокостабильной последовательности коррелированных СВЧ импульсов наносекундной и субнаносекундной длительностей в течение продолжительного времени, в пределах ограниченного только надежностью узлов схемы. Однако внедрение перед нагрузкой дополнительной стабилизирующей цепи с высокочастотными колебательными системами, имеющими сильную электродинамическую связь с автогенератором, позволит исключить нарушение баланса фаз, и повысить стабильность генерации возбуждаемых мод в спектре периодической последовательности коррелированных СВЧ импульсов.

Задачей, на решение которой направлено предложенное изобретение, является генерация стабилизированной последовательности коррелированных импульсов наносекундной и субнаносекундной длительностей в СВЧ диапазоне.

Технический результат достигается тем, что устройство генерации последовательности коррелированных импульсов в СВЧ диапазоне, также как и устройство-прототип, включает ЛБВ СВЧ диапазона, на выходе которой установлен направленный ответвитель, вторичное плечо которого через регулируемый аттенюатор подключено к входу ЛБВ. При этом ослабление регулируемого аттенюатора, определяющего глубину обратной связи, установлено таким, чтобы обеспечивался режим самосинхронизации N мод в ЛБВ. Новым является то, что в цепи обратной связи перед входом ЛБВ после регулируемого аттенюатора установлен полосовой фильтр, настроенный на выделение

полосы частот $\Delta F = N\Delta f$, где Δf - расстояние между соседними модами в спектре генерируемой последовательности импульсов, а к выходу основного плеча направленного ответвителя посредством согласующей волноводной линии, состоящей из последовательно включенных N волноводных тройников, подключен резонаторный блок, состоящий из N высокодобротных объемных резонаторов. Причем частота каждого i -го объемного резонатора настроена на частоту соответствующей моды f_i из спектра генерируемой последовательности импульсов ΔF , ненагруженная добротность каждого i -го объемного резонатора Q_i превышает ненагруженную добротность схемы генератора без резонаторного блока Q_0 , а фазовый сдвиг между выходом ЛБВ и конкретным i -м объемным резонатором подобран из условия баланса фаз $\phi_i = m_i\pi$, где $m_i = 1, 2, \dots$

Разработанное устройство генерации стабилизированной последовательности коррелированных импульсов в СВЧ диапазоне поясняется следующими чертежами.

На фиг. 1 показана блок-схема устройства генерации стабилизированной последовательности коррелированных импульсов в СВЧ диапазоне.

На фиг. 2 показана характерная зависимость нормированной мощности $P(t)$ на выходе генератора коррелированной последовательности коротких СВЧ импульсов от времени t .

Устройство генерации стабилизированной последовательности коррелированных импульсов в СВЧ диапазоне состоит из лампы бегущей волны 1, на выходе которой установлен направленный ответвитель 2, вторичное плечо которого через регулируемый аттенюатор 3 и полосовой фильтр 4 подключено к входу ЛБВ 1, к выходу основного плеча направленного ответвителя 2 через соответствующее количество волноводных тройников из волноводной согласующей линии 5 подключен резонаторный блок 6, состоящий из N высокодобротных объемных резонаторов.

Путем подстройки величины ослабления регулируемого аттенюатора 3 устанавливают глубину обратной связи, приводящую к генерации последовательности коррелированных коротких импульсов в режиме самосинхронизации мод.

Длительность τ генерируемого импульса определяется по уровню половинной мощности его огибающей (фиг. 2) как:

$$\tau \approx \frac{1}{\Delta F} = \frac{1}{N\Delta f},$$

где Δf - расстояние между соседними модами в спектре генерируемой последовательности импульсов ΔF ,

N - количество синхронизируемых мод в спектре генерируемой последовательности импульсов ΔF .

Период следования T импульсов (фиг. 2) определяется как:

$$T = \frac{1}{\Delta f}.$$

Полосу пропускания полосового фильтра 4 настраивают на выделение спектра генерируемой последовательности импульсов ΔF .

Сигнал стабилизируется за счет резонаторного блока 6. Резонансная частота f_{0i} каждого объемного резонатора настроена на частоту соответствующей моды f_i из спектра генерируемой последовательности импульсов ΔF , где $i = 1, 2, \dots, 2n + 1$ при $n = 1, 2, \dots$. Таким образом, количество объемных резонаторов $N_{\text{рез}}$ выбирается исходя

из ширины спектра частот выходного сигнала и равно количеству синхронизируемых мод:

$$N_{рез} = N = \frac{\Delta F}{\Delta f} = 2n + 1.$$

Фазовый сдвиг между выходом ЛБВ и конкретным i -м объемным резонатором определяется геометрическим расстоянием от выхода ЛБВ щели связи и подбирается из условия баланса фаз: $\varphi_i = m_i\pi$, где $m_i = 1, 2, \dots$

Стабилизация выполняется при условии, что ненагруженная добротность каждого

$$Q_i = 2\pi \frac{W_{i\text{нак}}}{W_{i\text{рас}}},$$

где $W_{i\text{нак}}$ - энергия, накопленная в i -м объемном резонаторе на резонансной частоте.

$W_{i\text{рас}}$ - энергия, рассеиваемая за период, в i -м объемном резонаторе на резонансной частоте f_{0i} , превышает ненагруженную добротность генератора Q_0 без резонаторного блока.

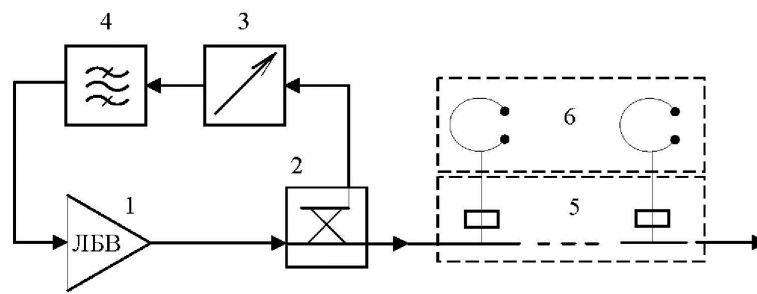
Таким образом, разработанное устройство благодаря использованию полосового фильтра и набору объемных резонаторов, последовательно включенных посредством согласующей волноводной линии перед полезной нагрузкой, позволяет генерировать стабилизированную последовательность коррелированных импульсов наносекундной и субнаносекундной длительностей в СВЧ диапазоне.

(57) Формула изобретения

Устройство генерации последовательности коррелированных импульсов в СВЧ

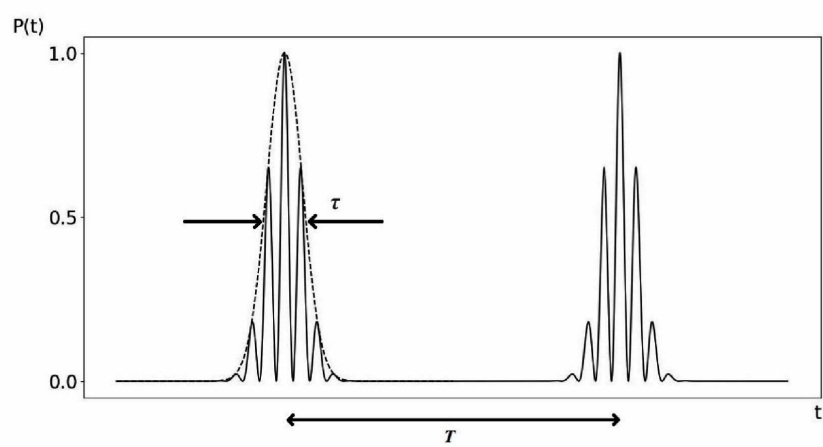
диапазоне, включающее ЛБВ СВЧ диапазона, на выходе которой установлен направленный ответвитель, вторичное плечо которого через регулируемый аттенюатор подключено к входу ЛБВ, а ослабление регулируемого аттенюатора, определяющего глубину обратной связи, установлено таким, чтобы обеспечивался режим самосинхронизации N мод в ЛБВ, отличающееся тем, что в цепи обратной связи перед входом ЛБВ после регулируемого аттенюатора установлен полосовой фильтр, настроенный на выделение полосы частот $\Delta F = N\Delta f$, где Δf - расстояние между соседними модами в спектре генерируемой последовательности импульсов, а к выходу основного плеча направленного ответвителя посредством согласующей волноводной линии, состоящей из последовательно включенных N волноводных тройников, подключен резонаторный блок, состоящий из N высокодобротных объемных резонаторов, причем частота каждого i -го объемного резонатора f_{0i} настроена на частоту соответствующей моды f_i из спектра генерируемой последовательности импульсов ΔF , ненагруженная добротность каждого i -го объемного резонатора Q_i превышает ненагруженную добротность схемы генератора без резонаторного блока Q_0 , а фазовый сдвиг между выходом ЛБВ и конкретным i -м объемным резонатором подобран из условия баланса фаз $\varphi_i = m_i\pi$, где $m_i = 1, 2, \dots$

1



Фиг.1

2



Фиг.2